

МИГРАЦИОННИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА ТВЪРДИЯ ОТПАДЪК (ПЕПЕЛИНАТА), ОТДЕЛЯН ПРИ ЕКСПЛОАТАЦИЯТА НА ТЕЦ

Николай Т. Стоянов

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", София 1700; nts@mgu.bg

РЕЗЮМЕ. Посредством лабораторни индикаторни опити в колони е направена оценка на миграционните характеристики на твърдия отпадък (пепелината), отделян при експлоатацията на ТЕЦ. Изследванията са направени с материал от площадката на Гипсоотвал №1 на обект ТЕЦ "Марица изток 2". Като индикатори са използвани хлоридни, сулфатни, натриеви и калиеви йони. Миграционните характеристики на пепелината са определени с разработената от автора компютърна програма LTT1DPI. Получените резултати могат да се използват не само за оценка на възможното замърсяване на подповерхностното пространство в района на ТЕЦ "Марица изток 2". Те имат универсален характер и е уместно да се ползват при моделиране на условията за разпространение на замърсителите и в други индустриални райони, където в горната част на разреза са установени насипи от пепелина.

MASS-TRANSPORT PARAMETERS OF THE ASH RELEASED FROM COAL BURNING AT A THERMOELECTRIC POWER PLANT

Nikolay T. Stoyanov

University of Mining and Geology "St. Ivan Rilski", Sofia 1700; nts@mgu.bg

ABSTRACT. Laboratory tracer experiments are performed in order to estimate the mass-transport parameters of the ash released from coal burning at a thermoelectric power plant (TPP). Solid waste products from coal burning at the "Maritsa east 2" TPP are used in the performed study. Chloride, sulphate, sodium and potassium ions are applied as tracers. The mass-transport parameters of the ash are determined by the application of the computer program LTT1DPI developed by the author. The obtained results can be used not only for the estimation of a possible contamination of the subsurface area in the region of the "Maritsa east 2" TPP. They have universal character and it is appropriate to apply them in the course of mass-transport modeling when the conditions of pollutants spread are estimated in other industrial regions where ash depositions are present in the near-surface part of the section.

Въведение

Отделеният при експлоатацията на ТЕЦ твърд отпадък (пепелина) се депонира под формата на сгуротвали, заемащи твърде големи по площ територии. Тези техногенни образувания формират съвременния ландшафт в големите индустриални райони. Така тук те изграждат най-горните части на подповерхностното пространство и в хидрогеоложки аспект могат да се разглеждат като част от зоната на аерация (неводоносителната зона). Нерядко върху пепелината се насипват и други отпадъчни материали, които са продукти от различни промишлени производства, строителството и минната дейност. Отделяните от тях конвенционални замърсители (Cl, SO₄, NO₃, Na, K, Ca, Mg, Fe, Mn, тежки метали и др.) преминават в подповерхностното пространство с инфилтриращите в дълбочина валежни води.

За по-точна оценка на обхвата и степента на възможното замърсяване на подповерхностното пространство в това число и на подземните води, както и за прогнозиране на възможното развитие на този процес е много важно доброто познаване на основните миграционни характеристики на средата – активна порестост n_0 , сорбционна порестост n_s и надлъжна дисперсивност α_L и

др. Тези интегрални характеристики най-общо отразяват физико-химичните процеси, които съпровождат разпространението на замърсителите. Те от една страна детерминират забавянето на фронта на замърсяване спрямо действителната скорост на филтрационния поток, а от друга – намалението на концентрациите на замърсителите по посока на потока.

В специализираната литература могат да се намерят данни за миграционни характеристики на основните литоложки разновидности (чакъли, пясъци, глинни и преходите между тях, както и за скални масиви с различна напуканост и окарстеност) по отношение на различни конвенционални замърсители (Garabedian, Gelhar and Celia, 1988; Gelhar et al., 1992; Harpaz, 1965; Papadopoulos and Larson, 1978 и др.). Посочените там стойности са приблизителни и не могат да обхванат широкото многообразие на природната среда. Те е възможно да бъдат ползвани главно при изготвянето на предварителни оценки или когато се правят прогнози за възможното замърсяване в регионален план. При по-детайлното проучване на условията за разпространение на замърсителите в границите на всеки конкретен обект, обаче, определянето на миграционните характеристики е въпрос с приоритетно значение.

Същевременно, в литературните източници липсват данни за миграционните характеристики на антропогенните пластове – строителни насипи, насипища от стерилни или бедни на полезни компоненти скали край минно-добивните обекти, сгуроотвалите край ТЕЦ и т.н. Ето защо, резултатите от проведените в рамките на този проект изследвания за определяне на миграционните характеристики на проби от сгуроотвала край ТЕЦ “Марица изток 2” са особено актуални и имат не само локално значение.

Обща характеристика на изследвания обект

Обект на изследване е Сгуроотвал № 1 на ТЕЦ “Марица изток 2”. Той е разположен на юг от централата и заема част от долината на р.Овчарица. Към момента на проучването е надграден до кота 162. В намитата пепелина са изградени три утаечни басейни, които последователно се наливат, осушават и изгребват.

Естествената морфология на терена е изцяло променена от насипаната минна маса от откритката на рудник “Трояново север” и от наливването на сгуропепелина от ТЕЦ “Марица изток 2”. До котата на наливане теренът е равнинен. Тук в резултат от хидротранспортирането на пепелината, както и от падналите валежи са формирани малки по площ и много плитки водоеми. Южно от площадката, са изградени минни насипи до коти 170 –200.

За определяне на зърнометричния състав и физико-механичните характеристики на пепелината в лабораторни условия са изследвани 10 проби. Резултатите показват, че насипаният (намитият) на сгуроотвала материал е хомогенен. Осреднени данни за зърнометричния състав и физичните характеристики на пепелината са представени в Таблица 1.

Таблица 1

Зърнометричен състав и физични характеристики на сгуропепелината

Зърнометричен състав	Фракция		
	Наименование		Съдържание, %
	Пясък	Едър	>1.0
		1.00-0.50	0.4
		0.50-0.25	1.2
		0.25-0.10	8.4
Физични характеристики	Прах	Едър	0.10-0.01
		0.010-0.005	58.0
	Глина	0.010-0.005	5.0
		<0.005	4.0
	Влажност, %		88.0
	Обемна плътност, g/cm ³		1.32
Физични характеристики	Специфична плътност, g/cm ³		2.36
	Плътност на скелета, g/cm ³		0.60
	Пористост, -		0.70
	Коефициент на филтрация, m/d		0.30

Голямото съдържание на прахова компонента е причина за относително ниската водопропускливост на пепелината. Същевременно, значителното присъствие на прахови и

глинести частици определя и високата задържаща способност на средата.

Методика на изследването

Опитна постановка

Лабораторните индикаторни опити обикновено се провеждат във филтрационни колонии. Затова често за тях се използва терминът “опити в колонии”. Подробно, относно необходимото оборудване, схемата и техниката на изпълнението на тези опити, могат да се намерят в голям брой литературни източници – Веригин (1977), Пенчев и Великов (1979), Бочев и др. (1979), Гълъбов и Пенчев (1986) и др.

Накратко, опитите в колонии се извършват в следната последователност. В колоната се вгражда материал от изследваната разновидност, след което се водонасища като водата се подава отдолу нагоре. В хода на опита от единия край на колоната с постоянна скорост v (от 0.1 до 1.0 m/d) се нагнетява (най-често посредством перисталтична помпа) чиста вода. Водата се филтрира през вградения материал и изтича от другия край на колоната. След стабилизирането на филтрацията започва нагнетяването на вода, в която е разтворен изследвания индикатор (замърсител) с начална концентрация c_0 . Предварително е определена и неговата фоновата концентрация в чистата вода c_f . След подаването на индикатора се следи изменението на концентрацията му на изхода на колоната $c(t)$. Опитът продължава до стабилизирането на изходните концентрации на индикатора. Възможно е подаването на индикатора да не бъде непрекъснато, а само за краен интервал от време (импулсно или пакетно). Този подход, обаче, не е препоръчителен, тъй като при него определянето на миграционните параметри е доста по-неточно.

Идентификационен метод

Съществуват различни идентификационни методи за определяне на миграционните характеристики по данни от индикаторните опити в колонии. Те се основават на аналитични, числени или полуаналитични решения на диференциалните уравнения, описващи процеса на миграция. Според начина на обработка идентификационните методи се отделят в две основни групи. В първата група попадат тези, които използват характерни точки от апроксимиращата данните от опита крива – Fried (1975), Пенчев и Великов (1979), Гълъбов (1983), Мироненко и Румынин (1986) и др. Към втората група се причисляват методите, основаващи се на сравнението на експерименталните данни със серия от теоретични криви. Сравнението се извършва или ръчно, с използването на еталонни криви, или автоматично, чрез различни математически алгоритми – Гълъбов (1979), Гълъбов и Пенчев (1984, 1986), Лукнер и Шестаков (1986), Sauti и Kinzelbach (1988) и др.

Данните от проведените индикаторни опити с пепелина от ТЕЦ “Марица изток 2” са обработени с компютърната програма LTT1DPI (Стоянов, 2003). В алгоритъма на

програмата е използвано аналитично решение на частното диференциално уравнение, описващо едномерното движение на замърсителите в пореста среда. Решението е получено при допускането, че в хода на експеримента подаването на индикатора е непрекъснато, а неговата входна концентрация е постоянна величина. То е изведено от Kinzelbach (1986) във вида:

$$c(t) = \frac{c_0}{2} \exp\left(\frac{x}{2\alpha_L}\right) \left[\exp\left(\frac{-x\gamma^*}{2\alpha_L}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x - \gamma^* tv}{\sqrt{\frac{4\alpha_L tv}{n_s}}}\right) + \exp\left(\frac{x\gamma^*}{2\alpha_L}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x + \gamma^* tv}{\sqrt{\frac{4\alpha_L tv}{n_s}}}\right) \right] \quad (1)$$

където:

$$\gamma^* = \sqrt{1 + \frac{4\gamma\alpha_L n_s}{v}} \quad (2)$$

$c(t)$ – концентрация на изхода на колоната в момент t от началото на опита, ML^{-3} ; c_0 – начална (входна) концентрация, ML^{-3} ; x – дължина на колоната, L ; v – скорост на филтрация (по Darcy), LT^{-1} ; n_s – сорбционна порестост, без дименсия; α_L – надлъжна дисперсивност, L ; γ – коефициент на елиминиране, T^{-1} ; t – време, T .

Необходимо е да се направи пояснението, че ако замърсителите са несорбируеми и се движат със скоростта на филтрационния поток, то сорбционната порестост n_s е равна на активната порестост на средата n_0 . Между тези две характеристики и по-общия и често използван параметър фактор на забавяне R_f съществува връзката:

$$n_s = n_0 R_f \quad (3)$$

За несорбируемите замърсители $R_f = 1$, а за сорбируемите – $R_f > 1$.

Имплементираният в LTT1DPI идентификационен метод се основава на напълно автоматизирано сравняване на експерименталните данни със серия от теоретични криви, получени с помощта на уравнение (1). Теоретичните криви се получават чрез вариране на търсените параметри n_0 , n_s , α_L и γ . За намиране на точните им стойности е използвана оптимизационната процедура Levenberg-Marquardt, с която се търси минимума в разликите между теоретичните криви и наблюденията от опита. Процедурата е подробно описана в специализираната литература – Marquardt (1961), Brown и Dennis (1972) и др.

Необходимите входни данни за програма LTT1DPI са: дължина на пробата x [m]; скорост на филтрация v [m/d]; фонова концентрация c_b [g/l]; начална концентрация c_0 [g/l]; текстов файл с данни за концентрацията $c_i = f(t_i)$ [g/l], където t_i е времето от началото на опита до i -тото измерване [min].

Описание на лабораторните миграционни изследвания. Резултати

За определяне на сорбционната порестост (n_s) и надлъжната дисперсивност (α_L) на пепелината, депонирана от ТЕЦ “Марица изток 2”, са проведени два индикаторни опита по описаната по-горе схема. Като индикатори при определенията са използвани силно подвижните (несорбируеми до много слабо сорбируеми) хлоридни и сулфатни йони и слабо подвижните (силно сорбируеми) натриеви и калиеви йони – Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ и K^+ .

Изследваните проби от пепелината са взети от изградения проучвателен сондаж в тялото на сгуроотвала. Проба № 1 е взета от дълбочина 1.0-1.5 m, а проба № 2 – от интервала 4.0-4.5 m. При подготовката на изходния индикаторен разтвор е използвана дестилирана вода, в която е разтворено определени количества натриев сулфат (Na_2SO_4) и калиев хлорид (KCl). Входните концентрации c_0 на Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ и K^+ са посочени в Таблица 2. В същата таблица са представени и данни за геометричните характеристики на вградените проби (дължина на пробите и радиусите на колоните), скоростите на филтрация v и фоновите концентрации c_b .

Таблица 2

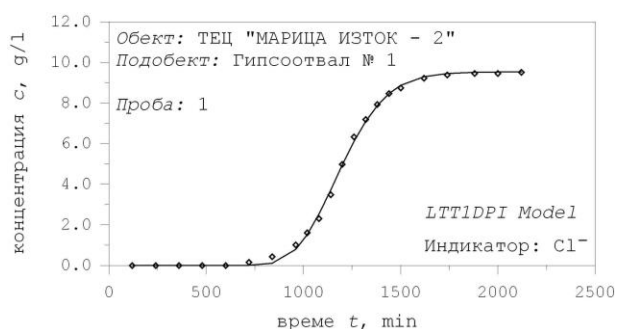
Данни за условията за провеждане на опитите

Проба №	ПРОБА № 1		ПРОБА № 2	
Колона №	колона 1		колона 2	
Дължина на пробата x , m	0.12		0.12	
Радиус на колоната r , m	0.008		0.008	
Скорост на филтрация v , m/d	0.132		0.141	
Индикатор (замърсител)	c_0 , g/l	c_b , g/l	c_0 , g/l	c_b , g/l
Cl^-	9.528	0.00	9.856	0.00
SO_4^{2-}	10.190	0.00	10.459	0.00
Na^+	4.695	0.00	4.826	0.00
K^+	10.485	0.00	10.862	0.00

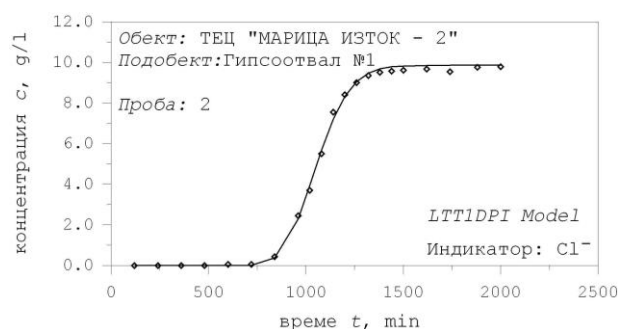
В хода на всеки опит през различни времеви интервали са вземани водни проби в обем от около 1-3 cm^3 . Физичните и хидрохимичните характеристики на взетите проби са определени електрометрично (за температурата и специфичната електропроводимост), титриметрично (за концентрациите на Cl^- и SO_4^{2-}) и с помощта на плазмен спектрометър ICP (за концентрациите на Na^+ и K^+).

За идентифициране на миграционните характеристики на изследваните проби получените експериментални зависимости, описващи изменението на концентрациите на Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ и K^+ във времето $c(t)$, са интерпретирани с програма LTT1DPI. На фиг. 1-8 опитните данни са илюстрирани с ромбчета. На същите фигури с пълтна линия са представени и получените с програма LTT1DPI идентификационни (апроксимиращи) криви.

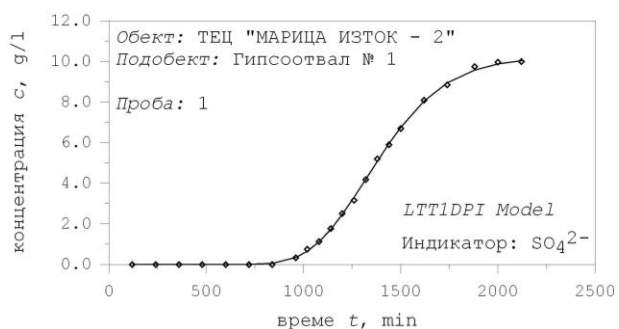
Изчислените за всяка проба и спрямо съответния индикатор стойности на n_s и на α_L са дадени в Таблица 3.



Фиг. 1. Филтрационна колонна 1. Индикатор Cl^-



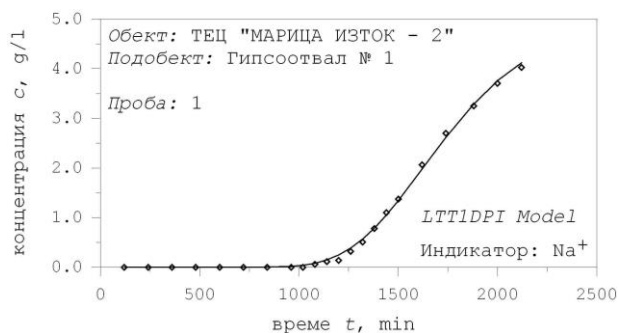
Фиг. 5. Филтрационна колонна 2. Индикатор Cl^-



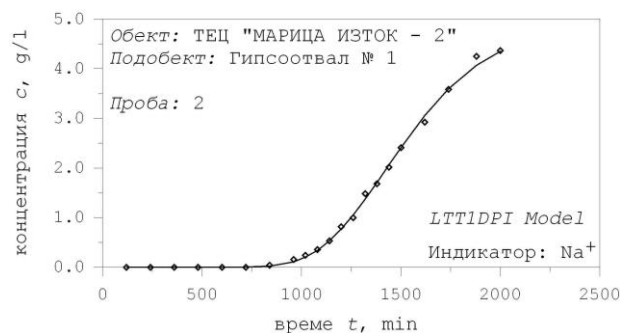
Фиг. 2. Филтрационна колонна 1. Индикатор SO_4^{2-}



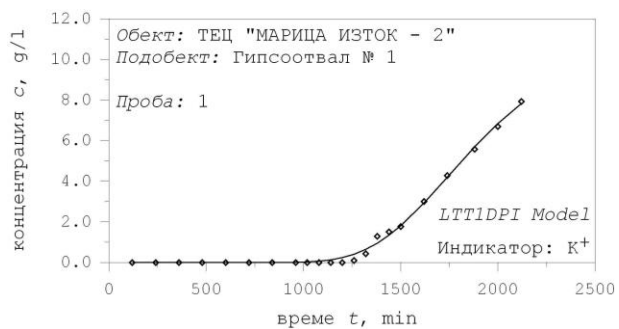
Фиг. 6. Филтрационна колонна 2. Индикатор SO_4^{2-}



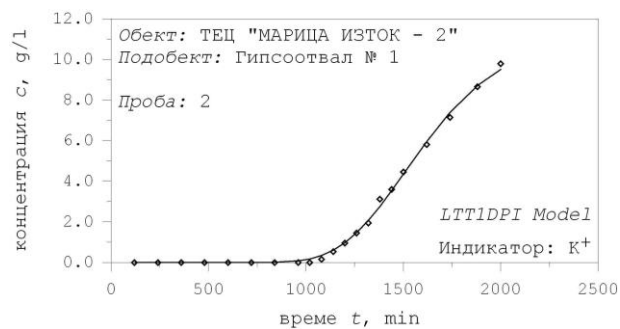
Фиг. 3. Филтрационна колонна 1. Индикатор Na^+



Фиг. 7. Филтрационна колонна 2. Индикатор Na^+



Фиг. 4. Филтрационна колонна 1. Индикатор K^+



Фиг. 8. Филтрационна колонна 2. Индикатор K^+

Таблица 3

Резултати от интерпретацията на опитните данни

Проба №	Проба № 1		Проба № 2	
Колона №	колона 1		колона 2	
Индикатор (замърсител)	n_s , -	α_L , m	n_s , -	α_L , m
Cl ⁻	0.92	0.002	0.86	0.001
SO ₄ ²⁻	1.07	0.003	1.03	0.002
Na ⁺	1.34	0.004	1.26	0.003
K ⁺	1.45	0.006	1.32	0.004

Обсъждане на резултатите

Идентификационните криви добре описват данните от лабораторните опити. За миграционните параметри се получават добри и логични резултати. Това се отнася особено за стойностите на сорбционната порестост n_s , които нарастват от по-едрият към по-дребните материали. Стойностите на надлъжната дисперсивност не следват подобна зависимост, но α_L в много по-голяма степен се влияе от точността при определянето на концентрациите. По принцип α_L се определя доста трудно чрез дребно мащабни индикаторни опити, особено от експерименти, провеждани в лабораторни условия.

Представените в Таблица 3 данни за миграционните характеристики на пепелината от Гипсоотвал № 1 на обект ТЕЦ "Марица изток 2" дават основание да се направи следния коментар:

- Пепелината притежава голяма способност да задържа вещество. Сорбционната порестост n_s за несорбируемите и много слабо сорбируемите аниогенни индикатори (Cl⁻ и SO₄²⁻) е по-висока от общата порестост n на изследваните проби и много по-висока от тяхното гравитационно водоотдаване. Докато средната стойност на n е около 0.70, то експериментално получените стойности за n_s варират в диапазона от 0.86 до 1.07. При това за сорбционната порестост за най-подвижните замърсители (Cl⁻) може да се приеме една средна стойност $n_s = 0.89$, а за по-слабо подвижните замърсители SO₄²⁻ – $n_s = 1.05$. Очевидно пепелината е в състояние частично да задържа механично и инертните (практически невзаимодействащите с твърдата фаза) хлоридни и сулфатни йони. Ето защо, е неуместно в тези условия Cl⁻ да се използва като еталон за определяне на активната порестост на средата.
- Катиогенните индикатори (Na⁺ и K⁺) се сорбират от филтрационната среда, независимо от състава и степента на нейната дисперсност, и мигрират по-бавно от аниогенните индикатори. Експерименталните резултати показват, че средната сорбционна порестост на пепелината за Na⁺ е $n_s = 1.30$, а за K⁺ – $n_s = 1.38$. Следователно фронтът на

интензивното замърсяване, който се маркира от поведението на слабо подвижните замърсители, в случая ще се движи с около 1.5 пъти по-бавно от фронтът, детерминиращ максималния обхват на възможното замърсяване.

- Получените стойностите за надлъжната дисперсивност α_L при двата опита и независимо от използвания индикатор са доста ниски – от порядъка на няколко милиметра. Това най-вероятно е свързано с малкия мащаб на миграционните изследвания.

Заклучение

Получените стойности за миграционните характеристики могат да се използват не само за оценка и прогноза за размерите и степента на възможното замърсяване на подповерхностното пространство в района на Гипсоотвал 1 на ТЕЦ "Марица изток 2". С известен резерв те имат универсален характер и е уместно да се ползват при моделиране на условията за разпространение на замърсителите в зоната на аерация и в други индустриални райони, където в горната част на разреза са установени насипи от пепелина. Същите биха били полезни и при решаване на по-широк кръг екологични задачи при различни по вид замърсявания.

Литература

- Бочев, Ф. М., Н. Н. Лапшин, А. Е. Орадовская. 1979. *Защита подземных вод от загрязнения*. М., Недра.
- Веригин, Н. Н. (ред.). 1977. *Гидродинамические и физико-химические свойства горных пород*. М., Недра.
- Гълъбов, М. М. 1979. Динамика загрязнителей в водоносном пласте при переменной интенсивности загрязнения на границе. – В: *Wissensch. Konf. Simul. Migration im Grundwasser*, Dresden.
- Гълъбов, М. М. 1983. *Динамика на подземните води*. С., Техника.
- Гълъбов, М., П. Пенчев. 1986. *Решаване на приложни хидрогеоложки задачи с помощта на ЕИМ*. С., Техника.
- Лукнер, Л., В. М. Шестаков. 1986. *Моделирование миграции подземных вод*. М., Недра.
- Мироненко, В. А., В. Г. Румынин. 1986. *Опытно-миграционные работы в водоносных пластах*. М., Недра.
- Пенчев, П., Б. Великов. 1979. Методически особености на лабораторните определения на някои основни физикохимични и хидродинамични параметри на замърсителите в подземните води. – *Хидротехника и мелиорация*, 10, 22-24.
- Стоянов, Н. 2003. *Оценка и прогнозиране на замърсяването на подземните води от депа за твърди битови отпадъци*. Дисертация, С., МГУ "Св. Иван Рилски", 215 с.
- Стоянов, Н. 2006. Идентификация на миграционните параметри на порестата среда по данни от лабораторни опити в колони. – *Сп. "БУЛАКВА"*, бр. 1.
- Brown, K. M., J. E. Dennis. 1972. Derivative free analogues of the Levenberg-Marquardt and Gauss algorithms for

- nonlinear least squares approximations. – *Numerische Mathematik*, 18, 289-297.
- Garabedian, S. P., L. W. Gelhar, M. A. Celia. 1988. *Large-scale dispersive transport in aquifers: Field experiments and reactive transport theory*. Rep. 315, Ralph M. Parsons Lab. for Water Resour. and Hydrodyn., Mass. Inst. of Technol., Cambridge.
- Gelhar, L. W., C. Welty, K. R. Rehfeldt. 1992. A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. – *Water Resour. Res.*, 28, 7, 1955-1974.
- Harpaz, Y. 1965. Field experiments in recharge and mixing through wells, Underground Water Storage. – *Study Tech. Rep.* 17, Publ. 483, Tahal-Water Plann. for Israel, Tel Aviv.
- Kinzelbach, W. 1986. *Groundwater Modelling - An Introduction and Sample Programs in BASIC*. Elsevier, Amsterdam.
- Marquardt, D. W. 1961. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. – *Journal Soc. Ind. Appl. Math.*, 2, 431-441.
- Papadopoulos, S. S., S. P. Larson. 1978. Aquifer storage of heated water; II, Numerical simulation of field results. – *Ground Water*, 16, 4, 242-248.
- Sauty, J. P., W. Kinzelbach. 1988. On the identification of the parameters of groundwater mass transport. – *Groundwater Flow and Quality Modelling, NATO ASI Series, E. Custodio et al. (Ed.)*, 33-56.

Препоръчана за публикуване от
Катедра "Хидрогеология и инженерна геология", ГПФ